ANALISIS PERCOBAAN PENAMBAHAN REFRIGERAN CO_2 TERHADAP EFEK PENDINGINAN PADA *AC SPLIT* RUMAH TANGGA KONVENSIONAL SEBAGAI UPAYA PENGEMBANGAN REFRIGERAN RAMAH LINGKUNGAN DAN BERKELANJUTAN

Bayu Widha Widiasmara[1], Safira Naila Rahini[1*], Muhammad Roni Hajianto[1]
[1]Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No 38, Blora, 58315
**E-mail*: firanaila258@gmail.com

ABSTRAK

Penggunaan refrigeran konvensional pada sistem *AC split* rumah tangga menimbulkan permasalahan lingkungan akibat potensi pemanasan global yang tinggi. CO_2 berpotensi sebagai refrigeran alternatif karena memiliki ODP nol dan GWP rendah. Penelitian ini menganalisis pengaruh penambahan CO_2 dengan fraksi massa rendah 0, 2, 4, dan 6 wt% pada R290 terhadap kinerja termal sistem *AC split* rumah tangga pada temperatur pengaturan 17–25°C. Penentuan fraksi CO_2 dilakukan melalui simulasi awal menggunakan *software Refprop* sebelum pengujian eksperimental. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan CO_2 mampu meningkatkan efek refrigerasi, namun nilai COP aktual tidak meningkat secara konsisten. COP aktual rata-rata berturut-turut sebesar 3,19; 2,72; 2,90 dan 2,15 pada fraksi CO_2 0, 2, 4, dan 6 wt%. Penurunan COP terutama disebabkan oleh peningkatan kerja kompresor yang lebih besar dibandingkan dengan peningkatan efek refrigerasi akibat perubahan karakteristik tekanan campuran R290-CO_2. Kondisi ini menunjukkan bahwa kompresor *AC Split Convensional* belum sepenuhnya sesuai dengan karakteristik campuran dan lebih sesuai untuk kapasitas pendinginan yang lebih besar. Sistem tetap beroperasi normal selama pengujian tanpa indikasi kegagalan komponen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan CO_2 fraksi rendah pada R290 berpotensi menjadi alternatif refrigeran campuran yang lebih ramah lingkungan pada sistem *AC split*.

Kata kunci: *AC split*, efek pendinginan, karbon dioksida

1. PENDAHULUAN

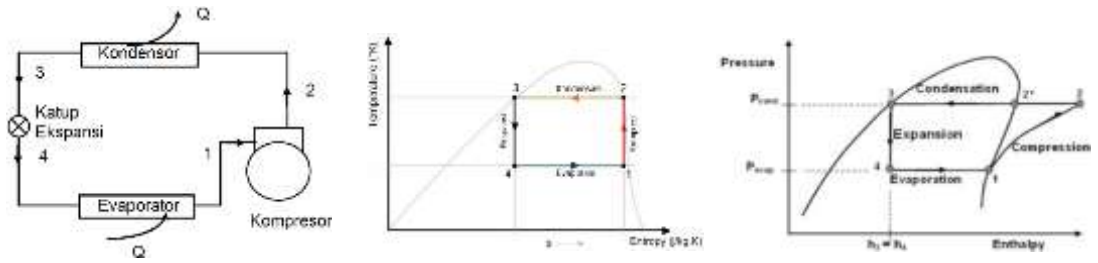
Sistem pendingin berbasis kompresi uap pada *AC split* rumah tangga konvensional memiliki peran penting dalam memenuhi kebutuhan kenyamanan termal. Kinerja sistem pendingin umumnya dievaluasi berdasarkan besarnya efek pendinginan yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemilihan refrigeran menjadi aspek yang sangat penting karena berpengaruh terhadap efisiensi, performa, serta karakteristik operasional sistem pendingin [1].

Namun, penggunaan refrigeran konvensional saat ini masih menjadi tantangan karena dampaknya terhadap lingkungan. Beberapa jenis refrigeran sintetis diketahui memiliki potensi merusak lapisan ozon *(Ozone Depletion Potential/ODP)* serta berkontribusi terhadap pemanasan global *(Global Warming Potential/GWP)* yang tinggi [2][3]. Kondisi tersebut menjadikan penggunaannya kurang sejalan dengan upaya transisi menuju sistem energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Selain dampak lingkungan, beberapa jenis refrigeran juga memiliki risiko keselamatan akibat sifat toksik dan mudah terbakar yang dapat membahayakan manusia maupun lingkungan apabila terjadi kebocoran atau kegagalan system [4]. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan refrigeran alternatif yang mampu memenuhi aspek

keberlanjutan, memiliki karakteristik termodinamika yang unggul, memberikan performa operasional yang optimal, serta menjamin keselamatan dalam pengoperasiannya.

Salah satu refrigeran alami yang potensial untuk dikembangkan adalah karbon dioksida (CO_2) karena memiliki nilai *Global Warming Potential* (GWP) yang sangat rendah, tidak merusak lapisan ozon (*Ozone Depletion Potential* = 0), tidak mudah terbakar, serta relatif aman digunakan dalam batas konsentrasi tertentu [5]. Selain itu, karbon dioksida merupakan produk samping dari berbagai proses industri, seperti industri minyak dan gas bumi serta pembangkitan energi, sehingga ketersediaannya relatif melimpah [6]. Untuk menilai kelayakan karbon dioksida (CO_2) sebagai refrigeran alternatif, diperlukan pengujian awal dalam skala laboratorium menggunakan sistem *Air Conditioner* (AC). Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan refrigeran alternatif terhadap efek pendinginan yang dihasilkan sehingga dapat diperoleh refrigeran yang tidak hanya ramah lingkungan dan berkelanjutan, tetapi juga mampu mempertahankan bahkan meningkatkan kinerja termal sistem pendingin.

Sistem *AC split* rumah tangga konvensional beroperasi berdasarkan siklus kompresi uap standar (*vapor compression refrigeration cycle*) yang merupakan siklus termodinamika pada mesin pendingin dan pompa kalor [7]. Siklus ini bekerja dengan memindahkan kalor dari lingkungan bersuhu rendah ke lingkungan bersuhu tinggi melalui pemanfaatan energi mekanik pada kompresor dan perubahan fase fluida kerja (refrigeran). Proses tersebut berlangsung melalui empat tahapan utama, yaitu kompresi, kondensasi, ekspansi, dan evaporasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 [7][8].



Gambar 1. Siklus kompresi uap standar dengan T-s & P-h diagramnya

Pada Gambar 1 ditunjukkan empat tahapan utama pada siklus kompresi uap standar. Proses 1–2 merupakan kompresi isentropik, yaitu ketika uap refrigeran bertekanan rendah dari evaporator dikompresi oleh kompresor sehingga tekanan dan temperaturnya meningkat hingga mencapai kondisi uap superpanas (*superheated vapor*) sebelum memasuki kondensor. Selanjutnya, pada proses 2–3 terjadi kondensasi isobarik di dalam kondensor, di mana refrigeran melepaskan kalor ke media pendingin, seperti udara atau air, pada tekanan konstan. Pelepasan kalor tersebut menyebabkan refrigeran mengalami penurunan entalpi dan perubahan fase dari uap menjadi cairan jenuh.

Pada proses 3–4 terjadi ekspansi isentalpik, yaitu ketika refrigeran cair bertekanan tinggi dialirkan melalui alat ekspansi menuju evaporator sehingga mengalami penurunan tekanan dan temperatur secara signifikan. Akibatnya, sebagian refrigeran mengalami penguapan (*flash evaporation*) dan membentuk campuran cair-uap (*wet vapor*). Tahap terakhir adalah proses 4–1, yaitu evaporasi isobarik yang berlangsung di dalam evaporator. Pada proses ini, refrigeran menyerap kalor dari ruangan yang dikondisikan pada tekanan konstan sehingga seluruh fase cair yang tersisa menguap menjadi uap jenuh. Refrigeran kemudian kembali dihisap oleh kompresor untuk memulai siklus pendinginan berikutnya.

Pada penelitian ini, analisis eksperimen dilakukan dalam skala laboratorium menggunakan sistem *AC split* rumah tangga konvensional untuk mengevaluasi kapasitas pendinginan yang

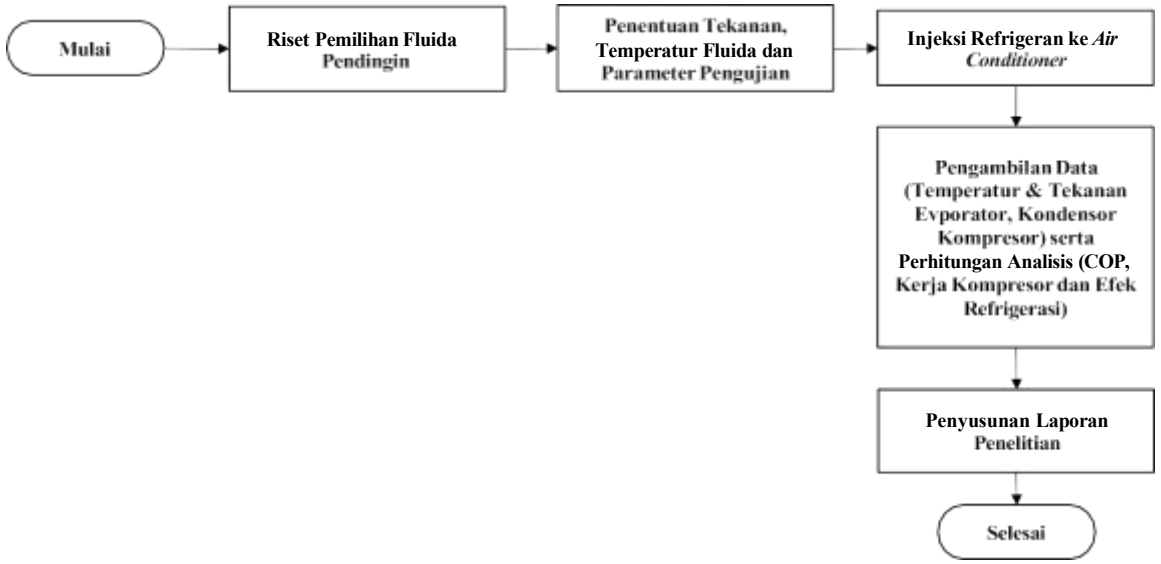
dihasilkan oleh campuran refrigeran CO_2. Pengujian selanjutnya dilakukan pada berbagai variasi refrigeran untuk menilai pengaruhnya terhadap kinerja termal sistem pendingin. Melalui pengujian tersebut, diharapkan dapat diperoleh refrigeran alternatif yang tidak hanya ramah lingkungan dan mendukung keberlanjutan, tetapi juga memiliki karakteristik termodinamika yang unggul, performa operasional yang optimal, serta tingkat keselamatan yang tinggi dalam penggunaannya.

Meskipun berbagai penelitian mengenai pemanfaatan CO_2 sebagai refrigeran pada sistem kompresi uap telah banyak dilakukan, sebagian besar penelitian tersebut menggunakan campuran refrigeran dengan kandungan CO_2 di atas 80 wt% pada sistem pendingin selain *AC split* rumah tangga konvensional [9][10]. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa peningkatan fraksi CO_2 pada rentang tersebut belum mampu meningkatkan efek pendinginan, bahkan cenderung menurunkannya [11][12]. Oleh karena itu, masih diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan campuran CO_2 dengan fraksi yang lebih rendah pada sistem *AC split* rumah tangga konvensional untuk memperoleh keseimbangan antara kinerja termal, aspek lingkungan, dan keselamatan operasional.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada pemanfaatan CO_2 sebagai refrigeran campuran dengan fraksi massa di bawah 10 wt% pada sistem *AC split* rumah tangga konvensional. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya menggunakan kandungan CO_2 lebih dari 80 wt%, penelitian ini mengevaluasi pengaruh penambahan CO_2 dalam jumlah kecil terhadap kinerja termal sistem, khususnya efek pendinginan yang dihasilkan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif komposisi refrigeran yang mampu meningkatkan kapasitas pendinginan, sekaligus tetap memenuhi aspek efisiensi energi, keberlanjutan lingkungan, dan keselamatan operasional.

2. METODE

Metode pengumpulan data pada penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen yang dilaksanakan di Bengkel Laboratorium Mekanik selama satu hari secara berkesinambungan untuk memperoleh data yang akurat dan konsisten. Adapun tahapan pelaksanaan penelitian disusun secara sistematis dan disajikan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart pelaksanaan penelitian

Tahap awal penelitian dilakukan melalui kajian literatur untuk mengidentifikasi refrigeran alternatif yang memiliki karakteristik ramah lingkungan dan berpotensi digunakan pada sistem AC split konvensional. Berdasarkan hasil kajian tersebut, dipilih refrigeran yang akan digunakan sebagai objek penelitian. Selanjutnya, dilakukan identifikasi parameter sifat termodinamika refrigeran, seperti tekanan kritis (*critical pressure*) dan temperatur kritis (*critical temperature*), sebagai acuan dalam perancangan kondisi pengujian. Karakteristik termodinamika masing-masing refrigeran disajikan pada Tabel 1 [5].

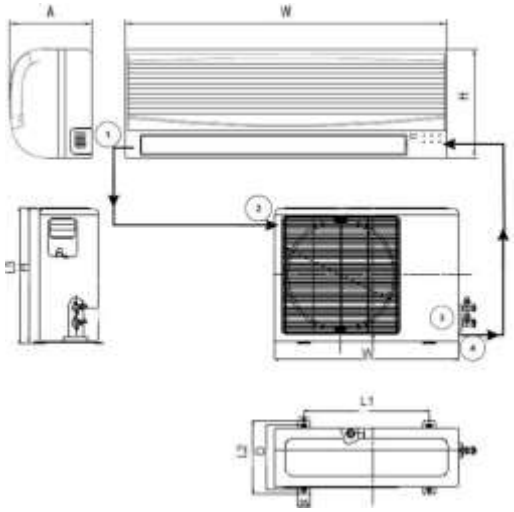
Tabel 1. Sifat dan properti fluida refrigeran

Jenis Refrigeran	Refrigeran	Temperatur Kritis (°C)	Tekanan Kritis (bar)	ODP	GWP (100 tahun)	Mudah Terbakar/Meledak	Toksisitas
CFCs dan HCFCs	R12	100.9	40.6	0.9	8100	Tidak	Tidak
	R22	96.2	49.8	0.055	1500	Tidak	Tidak
Pure HFCs	R32	78.4	58.3	0	650	Ya	Tidak
	R134a	101.1	40.7	0	1200	Tidak	Tidak
	R152a	113.5	45.2	0	140	Ya	Tidak
Campuran HFC	R404A	72.1	37.4	0	3300	Tidak	Tidak
	R407C	86.8	46	0	1600	Tidak	Tidak
	R410A	72.5	49.6	0	1900	Tidak	Tidak
Refrigeran Alami	Propana (R290)	96.8	42.5	0	3	Ya	Tidak
	Isobutana (R600a)	135	36.5	0	3	Ya	Tidak
	Amonia (R717)	132.2	113.5	0	0	Ya	Ya
	Karbon Dioksida (R744)	31	73.8	0	1	Tidak	Tidak

Berdasarkan Tabel 1, karbon dioksida (CO_2) merupakan refrigeran alami yang bersifat tidak mudah terbakar (*nonflammable*) dan tidak toksik (*nontoxic*), sehingga berpotensi digunakan sebagai refrigeran alternatif yang ramah lingkungan dan aman. Selanjutnya, dilakukan proses injeksi refrigeran ke dalam sistem AC split konvensional menggunakan campuran CO_2 dengan fraksi massa 2 wt% hingga 6 wt% terhadap refrigeran konvensional. Jenis refrigeran CO_2 yang digunakan serta proses injeksinya ke dalam sistem AC split konvensional ditunjukkan pada Gambar 3, dan Diagram pengambilan data ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Proses injeksi refrigeran CO2



Gambar 4. Diagram Pengambilan Data pada AC Split Konvensional

Setelah proses injeksi refrigeran selesai, sistem dioperasikan dan dilakukan pengambilan data temperatur dan tekanan refrigeran pada sisi masuk dan keluar evaporator. Data yang diperoleh digunakan untuk menentukan kondisi termodinamika refrigeran sehingga nilai entalpi pada setiap variasi campuran CO_2 0wt% hingga 6 wt% dapat dihitung. Pengambilan data dilakukan pada setiap kenaikan temperatur pengaturan AC sebesar 17–25 °C dengan interval waktu 3 menit. Selanjutnya, data tersebut digunakan untuk menganalisis efek pendinginan berdasarkan Persamaan 1.

$$RE = h1 - h4 \quad (1)$$

Persamaan tersebut digunakan untuk menganalisis dan membandingkan pengaruh penambahan CO_2 terhadap efek pendinginan yang dihasilkan oleh sistem pendingin. Hasil analisis selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan laporan teknis penelitian ini.

3. PEMBAHASAN

Percobaan yang telah dilakukan menghasilkan data temperatur dan tekanan refrigeran yang digunakan untuk menentukan nilai entalpi campuran refrigeran R290 dan CO_2 0 wt%, 2wt%, 4 wt%, dan 6 wt% pada sisi masuk dan keluar evaporator. Pengambilan data dilakukan pada setiap variasi campuran CO_2, yaitu 0 wt%, 2 wt%, 4 wt%, dan 6 wt%. Data percobaan dengan campuran CO_2 0 %wt, 2%wt, 4 %wt, dan 6 % wt dengan temperatur dan tekanan sistem disajikan pada Tabel 2 – 5, sebagai berikut:

Tabel 2. Data Temperatur dan Tekanan Campuran CO_2 0%

AC Temp at 1 atm (°C)	Temperatur				Tekanan			
	T1 (°K)	T2 (°K)	T3 (°K)	T4 (°K)	P1 (MPa)	P2 (MPa)	P3 (MPa)	P4 (MPa)
17	271.05	333.38	333.38	313.95	0.275	1.563	1.563	0.275
18	270.31	334.75	314.68	256.21	0.275	1.591	1.591	0.275
19	270.08	341.15	314.68	260.824	0.275	1.591	1.591	0.275
20	281.55	347.15	314.98	256.212	0.275	1.603	1.603	0.275
22	278.2167	354.85	316.416	256.212	0.275	1.659	1.659	0.2756
23	279.1833	265.112	317.016	256.212	0.275	1.6834	1.683	0.2756

24	278.2833	354.95	317.95	256.212	0.275	1.721	1.721	0.2756
25	280.2833	357.2167	316.95	256.2123	0.275	1.680	1.6806	0.9714
21	279.0167	346.85	315.95	256.212	0.275	1.641	1.641	0.275

Tabel 3. Data Temperatur dan Tekanan Campuran CO_2 2%

AC Temp at 1 atm (°C)	Temperatur				Tekanan			
	T1 (°K)	T2 (°K)	T3 (°K)	T4 (°K)	P1 (MPa)	P2 (MPa)	P3 (MPa)	P4 (MPa)
17	271.15	343.35	313.55	256.02	0.282	1.621	1.621	0.282
18	272.05	353.25	314.88	256.02	0.282	1.633	1.6332	0.282
19	273.25	352.75	315.05	256.38	0.282	1.680	1.685	0.282
20	269.15	353.45	314.65	256.034	0.282	1.664	1.664	0.282
21	268.97	355.35	314.55	256.033	0.282	1.660	1.660	0.282
22	268.65	357.65	315.16	256.039	0.282	1.683	1.684	0.282
23	268.55	358.39	314.45	256.032	0.282	1.656	1.656	0.282
24	268.85	357.25	314.05	256.028	0.282	1.641	1.641	0.282
25	269.15	358.25	313.65	256.024	0.282	1.625	1.625	0.282

Tabel 4. Data Temperatur dan Tekanan Campuran CO_2 4%

AC Temp at 1 atm (°C)	Temperatur				Tekanan			
	T1 (°K)	T2 (°K)	T3 (°K)	T4 (°K)	P1 (MPa)	P2 (MPa)	P3 (MPa)	P4 (MPa)
17	262.45	336.75	309.25	256.02	0.289	1.507	1.507	0.289
18	257.25	343.85	309.96	256.04	0.289	1.531	1.532	0.289
19	260.15	374.85	309.95	256.03	0.289	1.532	1.532	0.289
20	260.75	349.15	310.15	256.04	0.289	1.555	1.555	0.289
21	261.05	348.15	312.65	256.08	0.289	1.632	1.635	0.289
22	262.0	355.45	312.45	256.081	0.289	1.627	1.627	0.289
23	263.95	358.45	313.15	256.09	0.289	1.654	1.654	0.289
24	264.85	359.65	313.05	256.09	0.289	1.650	1.650	0.289
25	265.45	357.85	312.95	256.08	0.289	1.647	1.647	0.289

Tabel 5. Data Temperatur dan Tekanan Campuran CO_2 6%

AC Temp at 1 atm (°C)	Temperatur				Tekanan			
	T1 (°K)	T2 (°K)	T3 (°K)	T4 (°K)	P1 (MPa)	P2 (MPa)	P3 (MPa)	P4 (MPa)
17	255.55	367.15	312.15	256.12	0.296	1.664	1.664	0.296
18	260.35	366.75	313.85	256.16	0.296	1.731	1.731	0.296
19	260.15	370.75	314.25	256.17	0.296	1.748	1.748	0.296
20	260.55	374.15	316.16	256.21	0.296	1.826	1.826	0.296
21	261.05	374.75	313.85	256.16	0.296	1.731	1.731	0.296
22	264.55	374.15	316.15	256.21	0.296	1.826	1.826	0.296
23	266.15	376.15	316.15	256.21	0.296	1.826	1.826	0.296
24	263.05	378.35	313.95	256.16	0.296	1.738	1.736	0.296
25	269.15	356.25	313.95	256.024	0.282	1.625	1.625	0.296

Selanjutnya, pada percobaan dengan campuran CO_2 0 %wt, 2%wt, 4 %wt, dan 6 % wt diperoleh data entalpi refrigeran dan kerja kompresor sistem yang disajikan pada Tabel 6 - 9.

Tabel 6. Data Entalpi Percoban dan Kerja Kompresor Campuran CO_2 0%

AC Temp. at 1 atm (°C)	Evap. Out Entalpi/ h1. (kJ/kg)	Evap. In Entalpi/ h4. (kJ/kg)	Kerja Kompresor (kW)
17	398.35	250.35	36.5
18	398.40	250.10	37.2
19	397.30	250.12	44.2
20	398.10	251.42	45.5
21	399.00	252.05	47.6
22	397.30	251.16	50.3
23	398.60	252.23	52.2
24	398.00	252.32	53.9
25	398.40	253.09	54.9

Tabel 7. Data Entalpi Percoban dan Kerja Kompresor Campuran CO_2 2%

AC Temp. at 1 atm (°C)	Evap. Out Entalpi/ h1. (kJ/kg)	Evap. In Entalpi/ h4. (kJ/kg)	Kerja Kompresor (kW)
17	399.05	250.35	44.4
18	398.40	250.10	50.9
19	397.30	250.12	51.8
20	398.10	251.42	52.6
21	399.00	252.05	54.3
22	397.30	251.16	55.9
23	398.60	252.23	56.6
24	398.00	252.32	56.9
25	398.40	253.09	57.2

Tabel 8. Data Entalpi Percoban dan Kerja Kompresor Campuran CO_2 4%

AC Temp. at 1 atm (°C)	Evap. Out Entalpi/ h1. (kJ/kg)	Evap. In Entalpi/ h4. (kJ/kg)	Kerja Kompresor (kW)
17	399.6078533	244.40	45.3
18	398.93	246.26	46.1
19	398.87	246.21	48.4
20	397.98	246.52	49.5
21	399.57	249.19	50.3
22	399.2	248.98	54.8
23	398.97	249.98	57.1
24	398.81	249.77	57.9
25	399.2	250.36	58.2

Tabel 9. Data Entalpi Percoban dan Kerja Kompresor Campuran CO_2 6%

AC Temp. at 1 atm (°C)	Evap. Out Entalpi/ h1. (kJ/kg)	Evap. In Entalpi/ h4. (kJ/kg)	Kerja Kompresor (kW)
17	400.15	250.60	63.5
18	401	251.32	64.4
19	401.24	252.13	66.7
20	400.62	251.91	68.8
21	399.98	251.91	70.2
22	399.6	251.32	70.3
23	400.45	252.91	70.5
24	400.67	253.18	71.4
25	399.78	253.54	73.3

Berdasarkan Persamaan 1 dan data entalpi yang diperoleh dari hasil percobaan pada variasi campuran CO_2 0 wt%, 2 wt%, 4 wt%, dan 6 wt%, diperoleh nilai efek pendinginan dan COP pada masing-masing variasi campuran refrigeran. Adapun hasil perhitungan efek pendinginan dan COP untuk campuran CO_2 0 wt%, 2 wt%, 4 wt%, dan 6 wt%, disajikan pada Tabel 10 – 13 sebagai berikut.

Tabel 10. Efek Pendinginan dan COP Pada Campuran CO2 0%

AC Temp. at 1 atm (°C)	*Efek Pendinginan (kJ/kg)*	*COP Actual*	*COP Max.*
17	147.64	4.00	6.26
18	146.66	3.96	6.12
19	146.50	3.60	6.01
20	146.26	3.18	8.55

21	144.97	3.15	7.40
22	144.34	2.81	7.35
23	143.53	2.70	7.17
24	143.50	2.70	6.99
25	142.26	2.61	7.57

Tabel 11. Efek Pendinginan dan COP Pada Campuran CO_2 2%

AC Temp. at 1 atm (°C)	*Efek Pendinginan (kJ/kg)*	*COP Actual*	*COP Max.*
17	148.70	3.34	6.39
18	148.30	2.79	6.00
19	147.18	2.82	5.87
20	146.68	2.79	5.91
21	146.95	2.71	5.89
22	146.14	2.61	5.77
23	146.37	2.58	5.85
24	145.68	2.63	5.94
25	145.31	2.59	6.04

Tabel 12. Efek Pendinginan dan COP Pada Campuran CO_2 4%

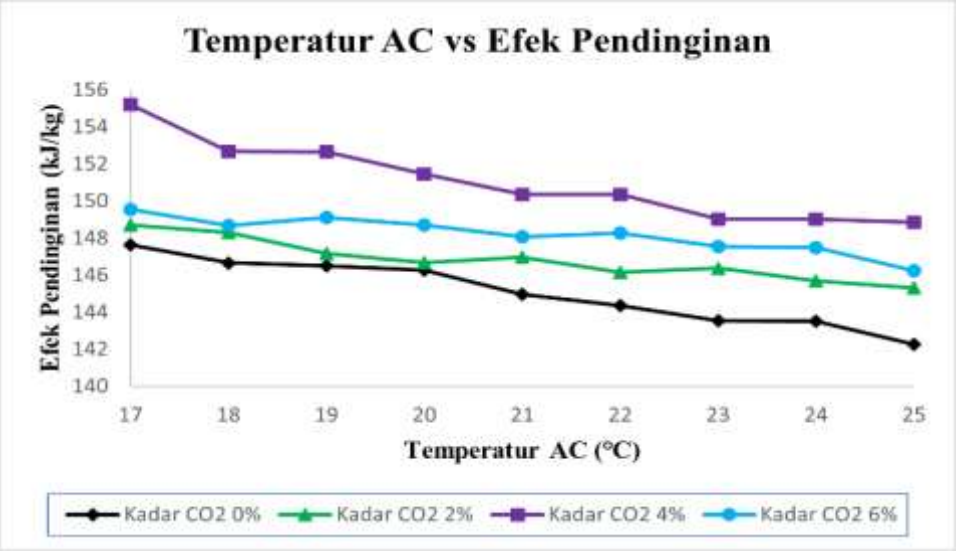
AC Temp. at 1 atm (°C)	*Efek Pendinginan (kJ/kg)*	*COP Actual*	*COP Max.*
17	155.20	3.83	5.60
18	152.67	3.35	4.88
19	152.65	3.10	5.22
20	151.45	3.03	5.23
21	150.37	3.09	5.02
22	150.23	2.74	5.20
23	149.01	2.61	5.36
24	149.03	2.57	5.49
25	148.84	2.64	5.58

Tabel 13. Efek Pendinginan dan COP Pada Campuran CO_2 6%

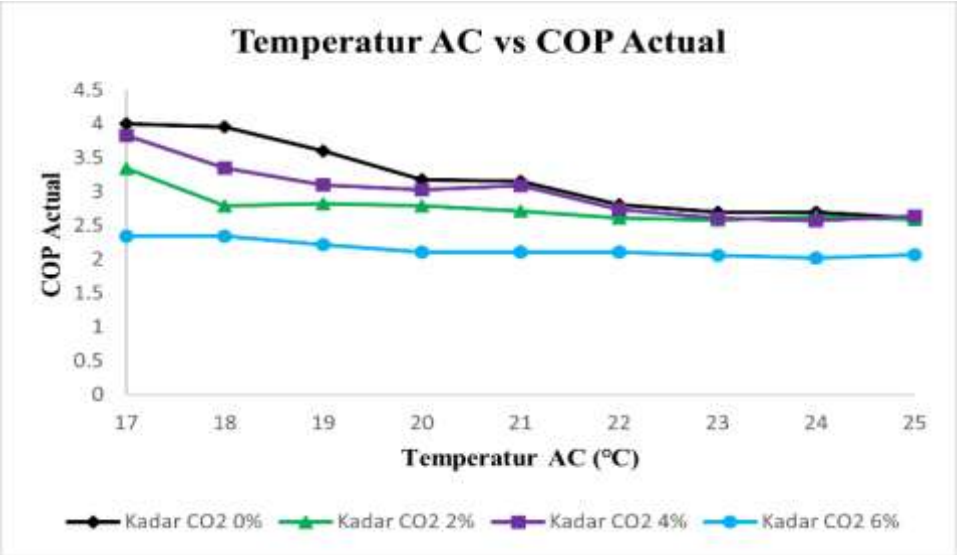
AC Temp. at 1 atm (°C)	*Efek Pendinginan (kJ/kg)*	*COP Actual*	*COP Max.*
17	149.56	2.34	4.51
18	149.68	2.34	4.86

19	149.10	2.22	4.80
20	148.71	2.11	4.68
21	148.07	2.11	4.94
22	148.28	2.11	5.12
23	147.54	2.06	5.32
24	147.49	2.02	5.16
25	146.23	2.07	5.06

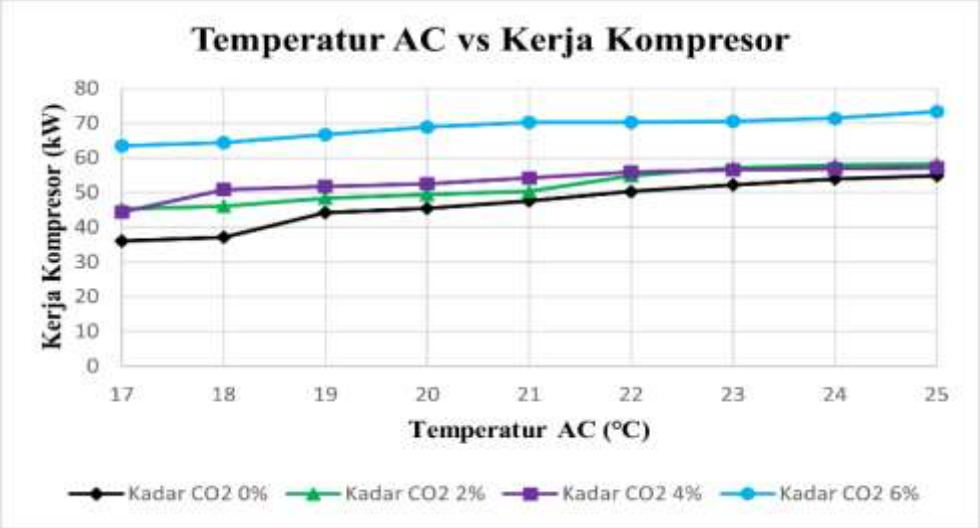
Untuk mempermudah analisis, data hasil percobaan mengenai pengaruh penambahan konsentrasi CO_2 terhadap temperatur dan tekanan, efek pendinginan, kerja kompresor dan COP aktual yang dihasilkan disajikan dalam bentuk grafik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 5. Kurva suhu *AC* terhadap efek pendinginan dan campuran CO2



Gambar 6. Kurva suhu *AC* terhadap Kerja Kompresor dan campuran CO_2



Gambar 7. Kurva suhu *AC* terhadap COP aktual dan campuran CO_2

Berdasarkan Gambar 4, 5 dan 6, peningkatan konsentrasi CO_2 pada fraksi massa di bawah 10 wt% cenderung meningkatkan efek pendinginan yang dihasilkan oleh sistem *AC split* rumah tangga konvensional. Hasil ini menunjukkan perbedaan dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa penggunaan campuran CO_2 dengan fraksi massa di atas 80 wt% cenderung menurunkan efek pendinginan. Dengan demikian, penambahan CO_2 dalam jumlah yang lebih rendah berpotensi memberikan peningkatan kinerja pendinginan pada sistem. Hal tersebut ditunjukkan oleh nilai efek pendinginan pada campuran CO_2 2 wt% yang lebih rendah dibandingkan dengan campuran CO_2 4 wt% dan 6 wt%. Penambahan CO_2 pada campuran refrigeran R290 meningkatkan efek pendinginan yang dihasilkan.

Namun, peningkatan efek pendinginan tersebut tidak diikuti oleh peningkatan COP aktual. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kerja kompresor yang lebih dominan dibandingkan dengan peningkatan efek pendinginan, sehingga rasio antara efek pendinginan dan kerja kompresor menjadi lebih kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik dan kapasitas kompresor pada AC konvensional yang digunakan belum sepenuhnya sesuai dengan karakteristik operasi campuran CO_2-R290, sehingga peningkatan kadar CO_2 menyebabkan kebutuhan kerja kompresor meningkat secara signifikan, Dengan demikian, penerapan campuran CO_2-R290 pada kadar yang lebih tinggi perlu mempertimbangkan sistem refrigerasi berkapasitas lebih besar, sehingga peningkatan kerja kompresor akibat penambahan CO_2 dapat diakomodasi oleh kapasitas sistem yang lebih tinggi.

Selain itu, hasil percobaan juga menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pengaturan (*setting temperature*) AC menyebabkan penurunan efek pendinginan, di mana efek pendinginan yang dihasilkan pada temperatur pengaturan yang lebih rendah lebih tinggi dibandingkan dengan pada temperatur pengaturan 25 °C. Selama proses pengujian, tidak ditemukan indikasi kegagalan maupun kerusakan komponen sistem, yang ditunjukkan oleh konsistensi data yang diperoleh pada setiap interval pengambilan data selama 3 menit serta kemampuan sistem AC split konvensional untuk tetap beroperasi secara normal. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan CO_2 dengan fraksi massa rendah tidak hanya berpotensi meningkatkan efek pendinginan, tetapi juga tetap mampu mempertahankan kestabilan dan keandalan operasional sistem pendingin.

4. SIMPULAN

Penentuan fraksi massa CO_2 di bawah 10 wt% dilakukan berdasarkan hasil simulasi awal di *software Refprop* untuk memastikan kondisi operasi campuran refrigeran tetap berada dalam batas yang aman sebelum dilakukan pengujian eksperimental pada sistem AC split konvensional. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penambahan CO_2 sebagai refrigeran campuran dengan fraksi massa rendah (di bawah 10 wt%) pada sistem AC split konvensional terbukti mampu meningkatkan efek pendinginan yang dihasilkan. Meskipun penambahan CO_2 mampu meningkatkan efek refrigerasi, peningkatan fraksi massa CO_2 menyebabkan nilai COP cenderung menurun. Nilai COP berturut-turut apabila di rata-ratakan sebesar 3.19 pada 0 wt%, 2.72 pada 2 wt%, 2.9 pada 4 wt%, dan 2.15 pada 6 wt% CO_2, Hal ini disebabkan oleh peningkatan kerja kompresor yang lebih besar dibandingkan peningkatan efek refrigerasi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kompresor pada sistem AC yang digunakan belum mampu bekerja secara optimal terhadap perubahan karakteristik campuran CO_2-R290, mengingat kompresor yang digunakan lebih direkomendasikan untuk sistem dengan kapasitas pendinginan yang lebih besar.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa peningkatan temperatur pengaturan (*setting temperature*) AC cenderung menurunkan efek pendinginan, sehingga efek pendinginan yang lebih tinggi diperoleh pada temperatur pengaturan AC yang lebih rendah. Temuan ini menunjukkan perbedaan dengan penelitian-penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa penggunaan campuran CO_2 dengan fraksi massa di atas 80 wt% cenderung menurunkan efek pendinginan, sehingga mengindikasikan bahwa penambahan CO_2 dalam jumlah yang lebih rendah berpotensi memberikan peningkatan kinerja pendinginan pada sistem AC split konvensional.

Selain menunjukkan peningkatan kinerja pendinginan, sistem AC split konvensional tetap mampu beroperasi secara normal selama proses pengujian tanpa ditemukan indikasi kegagalan maupun kerusakan komponen, yang ditunjukkan oleh kestabilan sistem dan konsistensi data yang diperoleh pada setiap interval pengambilan data selama 3 menit. Dengan demikian, penambahan CO_2 dalam fraksi massa rendah berpotensi untuk diterapkan sebagai refrigeran campuran yang tidak hanya mampu meningkatkan kinerja termal sistem pendingin, tetapi juga memberikan alternatif refrigeran yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan tetap memenuhi aspek keselamatan operasional pada sistem AC split konvensional.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] S. Zhao, L. He, X. Wu, G. Xu, J. Xie, and S. Cai, "Evaluation of thermal comfort in air-conditioned rooms based on structure/control-related parameters and data-mining method," *Int. J. Air-Conditioning Refrig.*, vol. 31, no. 1, p. 4, 2023, doi: 10.1007/s44189-023-00020-0.

[2] R. sugiono and U. Prayogi, "ANALISA PERBANDINGAN GLOBAL WARMING POTENTIAL (GWP) DAN OZONE DEPLETION POTENTIAL (ODP), PADA REFRIGERAN R32, R290, R407C, R410A, SEBAGAI PENGGANTI R22," *J. Tek. Mesin (Journal Mech. Eng.*, vol. 11, no. 1 SE-Articles, pp. 14–20, Mar. 2022, doi: 10.22441/jtm.v11i1.10992.

[3] W. S. Sarsam, "Assessment of using different ozone-friendly R22 alternative refrigerants in residential air conditioners in a high-ambient temperature country," *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 71, no. 1, p. 114, 2024, doi: 10.1186/s44147-024-00450-6.

[4] S. V. Shaik, S. Shaik, K. Gorantla, D. Mahapatra, and A. B. P. Setty, "Investigation on thermodynamic performance analysis and environmental effects of various new refrigerants used in air conditioners.," *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 27, no. 33, pp. 41415–41436, Nov.

2020, doi: 10.1007/s11356-020-09478-6.

[5] P. Maina and Z. Huan, "A review of carbon dioxide as a refrigerant in refrigeration technology," *S. Afr. J. Sci.*, vol. 111, p. 10, Sep. 2015, doi: 10.17159/sajs.2015/20140258.

[6] B. K. Sovacool, D. F. Del Rio, K. Herman, M. Iskandarova, J. M. Uratani, and S. Griffiths, "Reconfiguring European industry for net-zero: a qualitative review of hydrogen and carbon capture utilization and storage benefits and implementation challenges," *Energy Environ. Sci.*, vol. 17, no. 10, pp. 3523–3569, 2024, doi: 10.1039/d3ee03270a.

[7] R. Gentle, P. Edwards, and B. B. T.-M. E. S. Bolton, "2 - Thermodynamics," in *IIE Core Textbooks Series*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, pp. 7–111. doi: https://doi.org/10.1016/B978-075065213-1/50002-7.

[8] S. Seyam, "Energy and Exergy Analysis of Refrigeration Systems," T. Morosuk and M. Sultan, Eds., London: IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.88862.

[9] D. Sánchez, F. Vidan-Falomir, L. Nebot-Andrés, R. Llopis, and R. Cabello, "Alternative blends of CO2 for transcritical refrigeration systems. Experimental approach and energy analysis," *Energy Convers. Manag.*, vol. 279, p. 116690, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116690.

[10] E. Sicco *et al.*, "Experimental evaluation of CO2/R-152a mixtures in a refrigeration plant with and without IHX," *Int. J. Refrig.*, vol. 159, pp. 371–384, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.12.033.

[11] G. Vaccaro, A. Milazzo, P. Tobaly, A. T. Diaby, and L. Talluri, "Experimental results on a chiller using a CO2-DME mixture," *Int. J. Refrig.*, vol. 168, pp. 662–672, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.10.002.

[12] T. E. Oshodin, K. A. Bello, B. O. Bolaji, B. J. Olorunfemi, O. J. Aighovbiosa, and F. Onuh, "Investigating Internal Heat Exchanger Performance in a VCR System with a CO2 and LPG Refrigerant Mixture," *ABUAD J. Eng. Res. Dev.*, vol. 7, no. 2 SE-Articles, pp. 86–93, Jul. 2024, doi: 10.53982/ajerd.2024.0702.09-j.

Daftar Simbol

RE	=	Efek pendinginan, kJ/kg
h_1	=	Entalpi refrigeran keluar evaporator, kJ/kg
h_4	=	Entalpi refrigeran masuk evaporator, kJ/kg